محاسبه‌ی حداکثر بارش محتمل در حوضه‌ی آب‌ریز سد بختیاری با نگرش آماری و سینوپتیکی★

«یادداشت پژوهشی»

محمد حسین نوری قیداری[1] عبدالرسول تلوری[2]

چکیده دو روش اصلی برآورد صحیح حداکثر بارش محتمل (probable maximum precipitation) ، روش سینوپتیکی و روش آماری می‌باشد که در اغلب موارد نتایج آنها متفاوت است و انتخاب گزینه‌ی مناسب مشکل می‌باشد. این مشکل می‌تواند از آنجا ناشی شود که در اغلب تحقیقات فاکتور فراوانی در روش آماری برابر ۱۵ در نظر گرفته می‌شود که این یک حد نهایی است و برآورد بیشتری از PMP آماری ارائه می‌دهد. در این تحقیق PMP در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز با دو روش آماری و سینوپتیکی برای حوضه‌ی آب‌ریز سد بختیاری محاسبه شد و سعی گردید که فاکتور فراوانی در روش آماری براساس حداکثر بارش مشاهده شده به‌طور صحیح‌تر محاسبه و انتخاب شود. نتایج نشان داد که فاکتور فراوانی مناسب در روش آماری برای این حوضه حدود ٦/١ است که در این صورت نتایج آن تقریباً مشابه روش سینوپتیکی می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده در PMP سینوپتیکی و آماری با فاکتور فراوانی ٦/١ در تداوم‌های مختلف، حدود ۵۵ درصد از PMP مشاهده گردید در صورتی که در PMP آماری با فاکتور فراوانی ۱۵، کمتر از ۳۰ درصد PMP مشاهده شده‌است.

واژه‌های کلیدی حداکثر بارش محتمل، روش سینوپتیکی، روش آماری، فاکتور فراوانی، حوضه‌ی سد بختیاری.

Estimating the Probable Maximum Precipitation in the Bakhtiari Dam Basin Using the Statistical and Synoptical Methods

M.H. Noori Gheidari A.R.Telvari

Abstract *The two main approaches for estimating PMP are the synoptic and statistical techniques that their results are often different and selection of the appropriate option is difficult. In the most previous researches the frequency factor in the statistical method has been considered equal to 15 which this is the ultimate limit of frequency factor and the corresponding PMP is became too large. In the present research the PMP for 1 to 7 days durations in the Bakhtiari Dam basin was calculated using statistical and synoptic techniques, and the frequency factors in Statistical technique were properly determined. Results showed that the appropriate factor frequency in statistical technique for this area is about 6.1 which in this case, its results are almost the same as synoptic techniques. Based on the results of synoptical PMP and statistical PMP with factor frequency 6.1 at different durations, about 55 percent of the PMP have been observed, while for factor frequency 15, less than 30% of statistical PMP has been observed.*

Keywords Probable Maximum Precipitation, Synoptic Techniques, Statistical Techniques, Frequency Factor, Bakhtiari Dam Basin.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۱۱/۱۸و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۰/۱۳ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول،استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان.

(۲) استادیار، گروه مهندسی عمران، اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی اهواز.

مقدمه

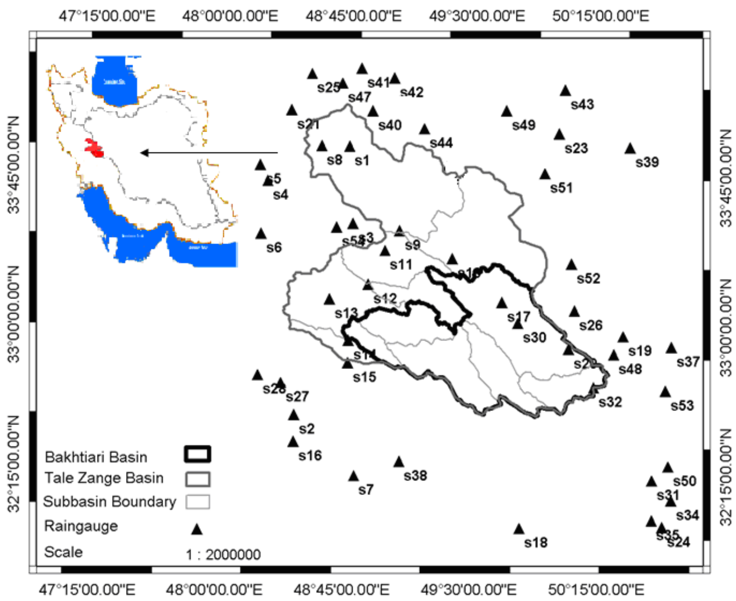
حداکثر بارش محتمل (PMP) به‌عنوان حداکثر عمق بارش در دوام معین تعریف می‌شود و می‌تواند از نظر فیزیکی در یک موقعیت جغرافیایی و در یک زمان معین از سال در سطح مشخصی اتفاق بیافتد و از نظر هواشناختی امکان تجاوز از آن وجود نداشته باشد. برای محاسبه‌ی حداکثر بارش محتمل دو روش آماری و سینوپتیکی مرسوم است و اکثر مواقع نتایج به‌دست آمده از این دو روش تفاوت چشم‌گیری داشته‌است که انتخاب گزینه‌ی مناسب مشکل می‌باشد [1]. روش آماری یک روش سریع و ساده می‌باشد که توسط هرشفیلد [2,3] در سال‌های ۱۹٦۱ و ۱۹٦۵ براساس رابطه‌ی فراوانی چائو [4] معرفی گردید. وی فاکتور فراوانی (K) را بین ۳ تا ۱۵ معرفی کرد. در سال ۱۹۸٦ سازمان جهانی هواشناسی اصلاح شده روش هرشفیلد را ارائه کرد [5]. دسا و همکاران در سال ۲۰۰۱ نگرش دیگری برای برآورد فاکتور فراوانی ارائه کردند [6]. آنها برای محاسبه‌ی حداکثر بارش محتمل ۲٤ ساعته در حوضه‌های مرطوب در مالزی، فاکتور فراوانی (K) هر ایستگاه را براساس حداکثر بارش سالانه در تداوم روزانه محاسبه کردند و حداکثر آنها را که برابر ۷/۵ بود به‌عنوان فاکتور فراوانی برای تمامی ایستگاه‌ها در نظر گرفتند و دریافتند که فاکتور فراوانی ۱۵ در روش هرشفیلد برای این حوضه بسیار زیاد می‌باشد. کاساس و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز براساس حداکثر بارش روزانه‌ی مشاهده‌شده، فاکتور فراوانی را در ناحیه‌ی کاتانیا واقع در اسپانیا ۸/۷ برآورد کردند [7]. کاساس و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای بارسلونا، فاکتور فراوانی را حدود ٦/٦ و دوره‌ی بازگشت PMP آماری ۲٤ ساعته را ۳٦۰۰۰۰ سال برآورد کردند [8].

در ایران نیز مثل اکثر نقاط دنیا، در کنار روش سینوپتیکی، روش آماری نیز برای برآورد PMP استفاده می‌شود ولی در اکثر مواقع مقدار فاکتور فراوانی برابر ۱۵ در نظر گرفته می‌شود که این امر باعث برآورد زیاد PMP آماری می‌گردد. فتاحی و همکاران در سال ۲۰۱۱ نشان دادند مقدار PMP آماری (با K=۱۵) در جنوب غرب ایران دو برابر روش سینوپتیکی می‌باشد [1]. قهرمان در سال ۲۰۰۸ در حوضه‌ی خشک اترک مقدار فاکتور فراوانی را براساس حداکثر بارش مشاهده‌شده برابر ۹/٦۳ برآورد کرد [9]. شفیعی و قهرمان در سال ۱۳۸۸ برای برآورد PMP آماری با تداوم ۲٤ در حوضه‌ی آبریز قره‌قوم براساس حداکثر بارش مشاهده شده از فاکتور فراوانی ۷/٦۳ استفاده کردند [۱۰]. تاج‌بخش و قهرمان در سال ۱۳۸۸ برای محاسبه‌ی PMP در شمال شرق ایران، فاکتور فراوانی را براساس حداکثر بارش مشاهده‌شده برابر ٦/۲ برآورد کردند [۱۱].

در این تحقیق، هدف محاسبه‌ی PMP آماری و سینوپتیکی در تداوم‌های مختلف برای حوضه‌ی سد بختیاری است و سعی شده است تا فاکتور فراوانی در روش آماری به‌طور صحیح‌تر با نگرش دسا و همکاران [6] برآورد گردد. وجه تمایز این تحقیق با تحقیقات گذشته مقایسه‌ی نتایج PMP آماری به‌دست آمده از نگرش دسا و همکاران با روش سینوپتیکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه. در این تحقیق منطقه‌ی مورد مطالعه حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی بختیاری می‌باشد. حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی بختیاری در جنوب غربی ایران می‌باشد. مساحت این حوضه‌ی کوهستانی برابر ٦۲۷٦ کیلومتر مربع است که در حوضه‌ی تله‌زنگ قرار دارد و بارش متوسط آن ۷۲۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. برای بررسی حداکثر بارش محتمل در حوضه‌ی آبریز سد بختیاری ٤۷ ایستگاه باران‌سنجی با طول آماری بین ۱۵ تا ٤۵ سال استفاده گردید. در شکل (۱) موقعیت این ایستگاه‌ها همراه با موقعیت زیرحوضه‌ها و حوضه‌ی تله‌زنگ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ حوضه‌ی آبریز سد بختیاری و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده‌شده در این تحقیق

روش آماری برآورد PMP در روش آماری هرشفیلد در سال‌های ۱۹٦۱ و ۱۹٥٦ برای محاسبه‌ی PMP در تداوم معین از رابطه‌ی زیر استفاده می‌گردد [2,3].

$$PMP = \bar{X}_n + K_m SD_n \qquad (۱)$$

که در آن $\bar{X}_n$ و SD_n به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار حداکثر بارش سالانه با تداوم معین می‌باشند که نسبت به حداکثر بارش ثبت شده اصلاح می‌گردند و K_m فاکتور فراوانی است که بین ۵ تا ۳۰ می‌باشد و از گراف‌های سازمان جهانی هواشناسی [5] در سال ۱۹۸٦ استخراج می‌شود و در اغلب موارد، مقدار این ضریب بیش از ۱۵ می‌باشد [۱۱].

دسا و همکاران [6] در سال ۲۰۰۱ و دسا و راجچا [12] در سال ۲۰۰۷ مقدار فاکتور فراوانی را برابر حداکثر مقدار K در ایستگاه‌های منطقه در نظر گرفتند. آنها مقدار K در هر ایستگاه را در تداوم مورد نظر از رابطه‌ی زیر محاسبه کردند.

$$K = (X_1 - \bar{X}_{n-1}) / \sigma_{n-1} \qquad (۲)$$

که در آن X_1 حداکثر بارش مشاهده‌شده در ایستگاه مورد نظر در تداوم معین است و $\bar{X}_{n-1}$ و σ_{n-1} به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌های حداکثر بارش سالانه در تداوم معین می‌باشد که در محاسبه‌ی آنها X_1 که داده‌ی حداکثر می‌باشد، حذف شده‌است. در این تحقیق پارامتر K برای تک تک ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه در تداوم‌های ۱ تا ۷ روزه محاسبه شده و حداکثر آن به‌عنوان فاکتور فراوانی K_m در محاسبه‌ی PMP در نظر گرفته شده‌است.

در این تحقیق PMP آماری در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز در سطح حوضه‌ی بختیاری با دو روش برآورد می‌گردد. یکی روش هرشفیلد [2] در سال ۱۹٦۱ با فاکتور فراوانی ۱۵ است و دیگری روش دسا و همکاران [6] در سال ۲۰۰۱ می‌باشد. در هر دو روش ابتدا PMP در تداوم مورد نظر برای تک تک ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از نرم‌افزار ILWIS به روش زمین آمار، توزیع مکانی PMP در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه محاسبه می‌شود و مقدار متوسط آن در سطح حوضه‌ی بختیاری استخراج می‌گردد که به‌عنوان PMP آماری در تداوم مورد نظر در سطح حوضه‌ی سد بختیاری انتخاب می‌گردد.

روش سینوپتیکی برآورد PMP. در محاسبه‌ی PMP به روش سینوپتیکی، رگبارهای شدید رخ‌داده بیشینه می‌شود و در نهایت حداکثر آنها به‌عنوان PMP در نظر گرفته می‌شود. براساس توصیه‌های سازمان هواشناسی جهانی [5]، رگبار بیشینه‌شده از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$P_m = P \ W_m/W \qquad (۳)$$

که در آن به‌ترتیب P عمق رگبار مشاهده‌شده، P_m عمق رگبار بیشینه‌شده، W آب قابل بارش متناسب با دمای نقطه‌ی شبنم در طول بارش و W_m: آب قابل بارش مربوط به حداکثر دمای نقطه شبنم در زمان وقوع بارش می‌باشد.

از آنجا که ورود توفان‌های شدید به منطقه‌ی مورد مطالعه از سمت جنوب غرب ایران می‌باشد، برای محاسبه‌ی ضریب بیشنه‌سازی توفان‌های بحرانی از آمار ایستگاه‌های سینوپتیکی بوشهر، آبادان، اهواز و دزفول که از کیفیت آماری مناسبی برخوردار هستند استفاده شده‌است. برای محاسبه‌ی ضریب بیشینه‌سازی یک توفان بحرانی، ابتدا حداکثر دمای نقطه‌ی شبنم در دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ ساله در زمان وقوع آن توفان برای تک تک ایستگاه‌های سینوپتیکی فوق محاسبه می‌شود و با استفاده از دیاگرام Skew-T-LOG-P [5] مقدار آنها در سطح ۱۰۰۰ میلی‌بار به‌دست می‌آید. سپس به‌کمک جداول پیشنهادی سازمان جهانی هواشناسی [5] حداکثر آب قابل بارش متناظر با حداکثر دمای نقطه‌ی شبنم با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال در سطح ۱۰۰۰ میلی‌بار برای ایستگاه‌های سینوپتیکی فوق استخراج می‌شود و از نسبت آنها به آب قابل بارش در زمان وقوع بارش، ضرایب بیشینه‌سازی در این ایستگاه به‌دست می‌آید. متوسط ضرایب بیشینه‌سازی توفان در ایستگاه‌ها به‌عنوان ضریب بیشینه‌سازی توفان در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه‌ی PMP سینوپتیکی در تداوم معین در سطح حوضه‌ی بختیاری، ۱) توفان‌های بحرانی انتخاب می‌شوند، ۲) با استفاده از نرم‌افزار ILWIS متوسط توفان‌های بحرانی در تداوم مورد نظر در سطح حوضه‌ی بختیاری برآورد می‌گردد، ۳) ضرایب بیشینه‌سازی به روش ذکرشده برای همه‌ی توفان‌های بحرانی محاسبه می‌شود، ٤) با استفاده از رابطه‌ی (۳) متوسط توفان‌های بحرانی که در بند ۲ محاسبه شد با اعمال ضرایب بیشینه‌سازی محاسبه‌شده در بند ۳، بیشینه می‌گردد و در نهایت ۵) از بین توفان‌های بیشینه‌شده حداکثر آنها به‌عنوان PMP سینوپتیکی در نظر گرفته می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج PMP آماری. در روش آماری وجود همگنی در داده‌های هر ایستگاه لازم می‌باشد. برای بررسی این موضوع از آزمون من– کندال استفاده شد [5] که نتایج نشان داد از بین ٤۷ ایستگاه مورد بررسی، ایستگاه‌های S30، S38 و S45 که موقعیت آنها در شکل (۱) مشخص است در سطح معنی داری ۵ درصد همگن نبوده‌اند و این ایستگاه‌ها در ادامه برای محاسبه‌ی PMP در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده نشده‌است. در ایستگاه‌های ناهمگن در سال‌های آماری جدید تعداد روزهای بارانی در مقایسه با ایستگاه‌های مجاور کمتر می‌باشد که این می‌تواند به‌علت عدم ثبت آمار بارندگی در بعضی مواقع باشد. کاهش بارندگی در این ایستگاه‌ها موجب ایجاد روند کاهشی در میانگین بارش می‌شود و در نهایت سبب ناهمگن شدن ایستگاه می‌گردد.

برای محاسبه‌ی PMP آماری به روش دسا و همکاران [6] در سال ۲۰۰۱ و دسا و راجچا [12] در سال ۲۰۰۷ ابتدا باید فاکتور فراوانی براساس حداکثر بارش مشاهده‌شده محاسبه گردد. برای این منظور با استفاده از رابطه‌ی (۲) پارامتر K در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز برای تک تک ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه محاسبه گردید که نتیجه‌ی آن در شکل (۲– الف) نشان داده شده‌است. با توجه به این شکل، حداکثر مقدار K در ایستگاه‌های منطقه برابر ٦/۱ در تداوم ٤ روز

می‌باشد که به‌عنوان فاکتور فراوانی (K_m) برای محاسبه‌ی PMP در نظر گرفته می‌شود. این نتیجه سازگار با تحقیقات گذشته می‌باشد. به‌عنوان نمونه کاساس و همکاران [8] در سال ۲۰۱۰ برای بارسلونا، فاکتور فراوانی را حدود ٦/٦ و شفیعی و قهرمان در سال ۱۳۸۸ این فاکتور را در حوضه‌ی آبریز قره‌قوم برابر ۷/٦۳ برآورد کردند [۱۰]. تاج‌بخش و قهرمان در سال ۱۳۸۸ در شمال شرق ایران، فاکتور فراوانی را به‌روش مشابه حدود ٦/۲ برآورد نمودند [۱۱].

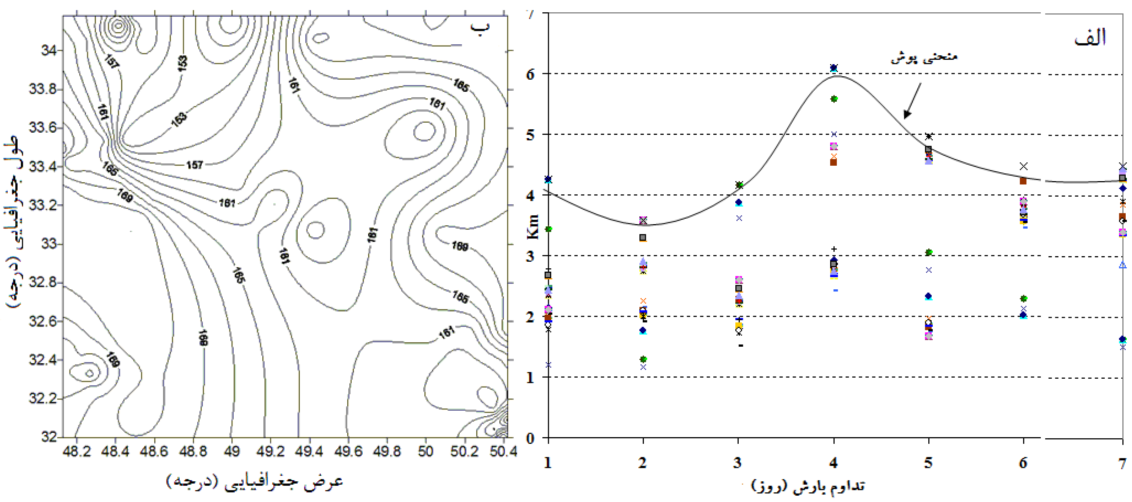
با در نظر گرفتن فاکتور فراوانی ٦/۱ مقدار PMP آماری با تداوم‌های ۱ تا ۷ روز برای تک تک ایستگاه‌ها محاسبه گردید و سپس با استفاده از نرم‌افزار ILWIS به روش کریجینگ با تغییر نمای توانی، متوسط PMP آماری در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز در سطح حوضه‌ی سد بختیاری محاسبه شد که به‌ترتیب برابر ۱٦۰، ۲۲٤، ۲۳۹، ۲٦٤، ۳۰۱، ۳۳۸ و ۳۵۲ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۲- ب) برای نمونه توزیع مکانی PMP یک روزه با فاکتور فراوانی ٦/۱ نمایش داده شده‌است که تغییرات آن در سطح منطقه کم و منطقی است.

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود برای PMP آماری با فاکتور فراوانی ٦/۱ در سطح حوضه‌ی سد بختیاری رابطه‌ی توانی زیر بین مقدار و تداوم بارش برقرار است و ضریب تعیین آن برابر $R^2 = 0.979$ می‌باشد.

$$PMP(D) = 160.6\,D^{0.3957} \qquad (٤)$$

که در آن D تداوم بارش بر حسب روز است و PMP(D) حداکثر بارش محتمل در تداوم D در سطح حوضه‌ی سد بختیاری بر حسب میلی‌متر می‌باشد. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که آهنگ افزایش PMP با افزایش تداوم کاهش می‌یابد و برای تداوم‌های بزرگ‌تر از ٤ روز، افزایش PMP قابل توجه نمی‌باشد. این می‌تواند ناشی از آن باشد که بارش‌های شدید در مدت زمان کوتاهی رخ می‌دهد. به‌طور مثال بخش بسیار زیادی از بارش ۷ روزه در مدت زمان ٦ ساعت رخ می‌دهد.

در این تحقیق PMP آماری هم‌چنین با فاکتور فراوانی ۱۵ در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز در سطح حوضه‌ی سد بختیاری محاسبه گردید که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش فاکتور فراوانی از ٦/۱ به ۱۵ مقدار PMP آماری در تداوم‌های مختلف به بیش از دو برابر افزایش پیدا می‌کند. بدیهی است که این نسبت نیز برای PMP های متناظر با آنها نیز برقرار خواهد شد.



شکل ۲ الف) مقدار فاکتور فراوانی(K_m) در تداوم‌های مختلف در ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه و ب) توزیع مکانی PMP آماری در تداوم روزانه با فاکتور فراوانی ٦/۱ در سطح منطقه‌ی مورد مطالعه

از آنجا که شرایط آب و هـوایی منـاطق مختلـف دنیا متفاوت است، مقایسه‌ی PMP آنها ممکن نیست و تنها راه ممکن مقایسه‌ی نسبت PMP به حداکثر بـارش مشاهده شده‌است. در شکل (٤) نمودار جعبه‌ای نسبت PMP آمـاری بـه حـداکثر بـارش مشـاهده‌شـده بـرای تداوم‌های ۱ تا ۷ روز در ایستگاه‌هـای منطقـه‌ی مـورد مطالعه نشـان داده شـده‌اسـت. در ایـن نمـودار در هـر جعبه، خطوط افقی از بالا به پایین بـه‌ترتیـب حـداکثر، چـارک سـوم، میانـه، چـارک اول و حـداقل داده‌هـا می‌باشد. همان‌طور که در شکل (٤) مشـاهده مـی‌شـود نسبت PMP آماری به حداکثر بارش مشاهده‌شده برای PMP آماری با فاکتورهای فراوانـی ٦/۱ بـین ۱/٥ تـا ۲ است که مشابه محدوده‌ی به‌دست آمده توسـط دسـا و همکاران [6] در سال۲۰۰۱، دسا و راخچا [12] در سال ۲۰۰۷ و تـاج‌بخـش و قهرمـان [۱۱] در سـال ۱۳۸۸ می‌باشد. با توجه به شکل (٤) ، این نسبت بـرای PMP آماری با فاکتور فراوانی ۱٥ در تداوم های ۱ تـا ۷ روز بین ۲/٥ تا ٤/٥ قرار دارد. بختیاری [۱۳] در سال ۱۳۸۰ در ایستگاه‌هـای جنـوب شـرق ایـران و تـاج‌بخـش و قهرمان [۱۱] در سال ۱۳۸۸ در شمال شرق ایران نسبت PMP آماری با فاکتور فراوانـی ۱٥ بـه حـداکثر بـارش مشاهده‌شده را بـه‌ترتیـب ۲/٥ تـا ۳/٥ و ۲/٥٤ تـا ٦/۸ برآورد کردند. با توجه به نتایج این تحقیق و تحقیقـات گذشته می‌توان دریافت دامنه تغییرات این نسـبت‌هـای برای فاکتور فراوانی ٦/۱ کمتر می‌باشد که این موجـب افزایش اعتمادپذیری می‌گردد.

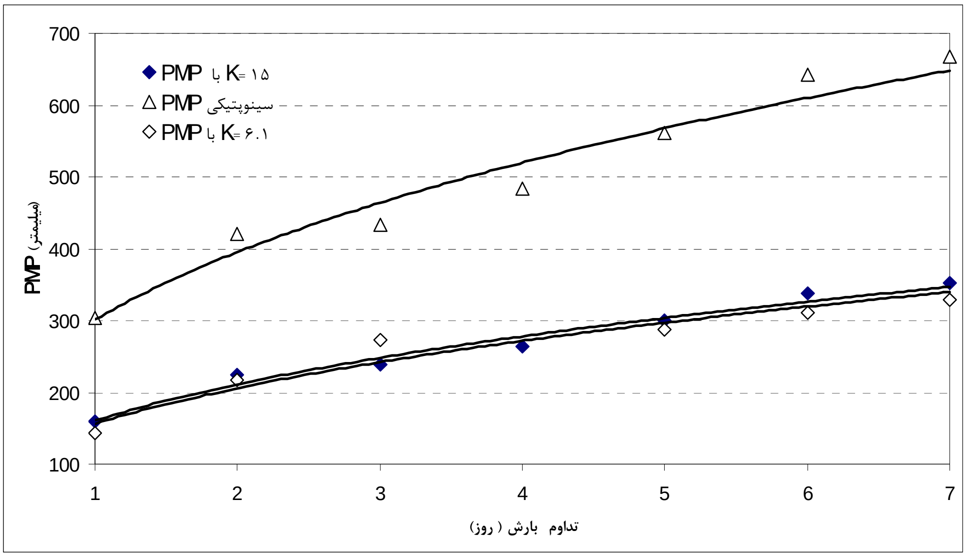
نتـایج PMP سـینوپتیکی. بـرای محاسـبه‌ی PMP به‌روش سینوپتیکی، ابتدا با بررسی آمار بارنـدگی‌هـا و سیلاب‌ها، ۱۱ مـورد از توفـان‌هـای شـدید انتخـاب و متوسط آنها با روش کریجینگ و بـا واریـوگرام تـوانی به‌وسـیله‌ی نـرم‌افـزار ILWIS در سـطح حوضـه سـد بختیاری برآورد گردید که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده‌است.

برای بیشینه‌سازی این توفان‌ها از آمار ایستگاه‌های سینوپتیکی اهواز، آبادان، بوشهر و دزفول کـه در مسـیر ورودی این توفان‌ها قرار دارند استفاده شـد. بـه‌عنـوان نمونـــه در جـــدول (۲) رونـــد محاســـبه‌ی ضـــریب بیشینه‌سازی طوفـان ٤ الـی ٦ فـروردین مـاه ۷۹ ارائـه شده‌است. در این تحقیق برای محاسبه‌ی حداکثر دمـای نقطه‌ی شبنم در زمان وقوع بارندگی با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال از توزیع گامبل استفاده شده‌است. در جـدول (۳) ضرایب بیشینه‌سازی همه‌ی توفان‌های بحرانی ارائه شده‌است. با اعمال ضرایب بیشینه‌سازی در توفان‌هـای بحرانی مقادیر بیشینه شـده‌ی ایـن توفـان‌هـا بـه‌دسـت می‌آید که نتایج در جدول (۳) ارائه شده‌است. حـداکثر مقدار این توفان‌ها در یک تداوم معین بـه‌عنـوان PMP سینوپتیکی در همـان تـداوم در نظـر گرفتـه مـی‌شـود. براساس جدول (۳) PMP سینوپتیکی بـرای تـداوم ۲٤ ساعت مربوط به توفان فروردین ۷۹ است که مقدار آن در سطح حوضه‌ی بختیاری ۱٤٥/٦ میلی‌متر مـی‌باشـد. PMP سینوپتیکی دو و سه روزه ناشی از توفـان اسـفند ۷۰ است و به‌ترتیـب برابـر ۲۱٦/٤ و ۲۷۲/٤ میلـی‌متـر می‌باشد. مقدار PMP ٤ روزه بـه‌دلیـل بیشـتر شـدن از تداوم ٥ روزه قابل قبول نبود. اما PMP ٥، ٦ و ۷ روزه مربوط به توفان دی و بهمن ٤۷ است که به‌ترتیب برابر ۲۷۸، ۳۰۹/٦ و ۳۲٦/٥ میلی‌متر می‌باشند.

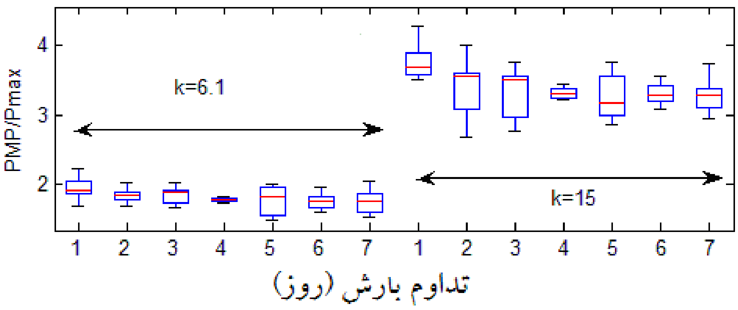
با توجه به شکل (۳) می‌توان رابطه‌ی تـوانی زیـر را، که ضریب تعیین آن $R^2 = 0.9422$است، بـین PMP سینوپتیکی و تداوم آن برقرار کرد.

$$PMP(D) = 156.2\,D^{0.3994} \qquad (٥)$$

PMP سـینوپتیکی بـه‌نسـبت حـداکثر بـارش مشاهده‌شده در تداوم‌های مختلف مشابه روش آمـاری با فاکتور فراوانی ٦/۱، بین ۱/٥ و ۲ می‌باشد (شکل ٤). این نشان می‌دهد کـه بـرآورد PMP سـینوپتیکی زیـاد نمی‌باشد و در حد معقول است.



شکل ۳ منحنی تغییرات PMP سینوپتیکی و آماری با فاکتورهای فراوانی ٦/١ و ١٥ در تداوم‌های مختلف



شکل ٤ نمودار جعبه‌ای نسبت PMP آماری در تداوم‌های مختلف به حداکثر بارش مشاهده‌شده در ایستگاه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

جدول ١ مقدار توفان‌های شدید رخداده در سطح حوضه‌ی سد بختیاری برحسب میلی‌متر در تداوم‌های مختلف

تاریخ توفان	تداوم بارش						
	۱ روز	۲ روز	۳ روز	٤ روز	٥ روز	٦ روز	۷ روز
آذر ٥٧	٥٤/٩	٦٧/٥	٩٩/٨	١٠٩/١	١١٤/٩	١٣٥/١	١٦٥/٤
آذر ٧٣	٥١/٤	٧١/٦	١١٦/٩	١٢٦/٩	١٣٤/٢		
دی و بهمن ٤٧	٦٠/٠	١٠١/٣	١٠٧/٤	١٦٩/٧	١٨٢/٩	٢٠٣/٧	٢١٤/٨
اسفند ٦٥	٤١/٨	٧٠/٦	٩٨/٠	١١٤/٠	١٢٢/٥	١٣٤/٣	١٣٩/٥
اسفند ٧٠	٤٤/٩	٧٨/٤	٩٨/٨				
اسفند ٨٣	٧٤/٨	١٤٧/٩	١٧٥/٣	١٨٤/١			
فروردین ٦٠	٥٢/١	٧٨/٦	٩٣/٧				
فروردین ٧٧	٦٠/٠	٩١/٤	١٠٩/٨				
فروردین ٧٩	٥٢/٢	٦٦/٣	٩٣/٨				
اردیبهشت ٦٥	٤٦/٠	٧٢/٩					
اردیبهشت ٧٢	٥٧/٦	٨٨/٩	١٠٠/٥				

جدول ۲ محاسبه‌ی ضریب بیشینه‌سازی توفان ٤ الی ٦ فروردین ماه ۷۹

ایستگاه سینوپتیک	دمای نقطه شبنم در زمان وقوع	آب قابل بارش در زمان وقوع بارندگی (mm)	حداکثر دمای نقطه شبنم در زمان وقوع بارندگی با دوره بازگشت ۱۰۰	آب قابل بارش در زمان وقوع بارندگی با دوره بازگشت ۱۰۰ سال (mm)	ضریب بیشینه سازی
آبادان	۱۲/۱	۹/۱	۲۰	۲۵	۲/۷٤
اهواز	۱۳	۱۰	۲۱/۳	۳۱/٥	۳/۱٥
بوشهر	۱۱/٥	۸/٥	۱۹/۳	۲۳/٦	۲/۷۷
دزفول	۱۳/۲	۱۰/۲	۲۰/۲	۲٥/٦	۲/٥
				متوسط	**۲/۷۹**

جدول ۳ ضرایب بیشینه‌سازی و مقدار بیشینه‌شده توفان‌های شدید بر حسب میلی‌متر در سطح حوضه‌ی سد بختیاری در تداوم‌های مختلف

تاریخ توفان	ضریب بیشینه‌سازی	تداوم بارش						
		۱ روز	۲ روز	۳ روز	٤ روز	٥ روز	٦ روز	۷ روز
آذر ٥۷	۱/۳۷	۷٥/۲	۹۲/٥	۱۳٦/۷	۱٤۹/٥	۱٥۷/٤	۱۸٥/۱	۲۲٦/٦
آذر ۷۳	۱/۷۸	۹۱/٥	۱۲۷/٤	۲۰۸/۱	۲۲٥/۹	۲۳۸/۹		
دی و بهمن ٤۷	۱/٥۲	۹۱/۲	۱٥٤/۰	۱٦۳/۲	۲٥۷/۹	۲۷۸/۰	۳۰۹/٦	۳۲٦/٥
اسفند ٦٥	۱/٦٥	٦۹/۰	۱۱٦/٥	۱٦۱/۷	۱۸۸/۱	۲۰۲/۱	۲۲۱/٦	۲۳۰/۲
اسفند ۷۰	۲/۷٦	۱۲۳/۹	۲۱٦/٤	۲۷۲/۷				
اسفند ۸۳	۱/٥۷	۱۱۷/٤	۲۳۲/۲	۲۷٥/۲	۲۸۹/۰			
فروردین ٦۰	۱/۸٤	۹٥/۹	۱٤٤/۹	۱۷۲/٤				
فروردین ۷۷	۱/٥۸	۹٤/۸	۱٤۳/۹	۱۷۳/٥				
فروردین ۷۹	۲/۷۹	۱٤٥/٦	۱۸٥/۰	۱٦۱/۷				
اردیبهشت ٦٥	۱/۹۹	۹۱/٥	۱٤٥/۱					
اردیبهشت	۲/۰۲	۱۱٦/۳	۱۷۹/٦	۲۰۳/۰				

مقایسه‌ی نتایج. با توجه به شکل (۳)، تفاوت PMP سینوپتیکی و آماری با K= ٦/۱ در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز ناچیز و تقریباً نتایج یکسان می‌باشد. در حالی که مقدار PMP آماری با فاکتور فراوانی ۱۵ حدود دو برابر PMP سینوپتیکی و آماری با K= ٦/۱ می‌باشد. از آنجا که در مناطق خشکی مثل ایران ضریب تغییرات و انحراف معیار داده‌های بارش زیاد می‌باشد، در نظر گرفتن فاکتور فراوانی ۱۵ مقادیر زیادی برای PMP آماری ارائه می‌دهد که تفاوت آن با نتایج سینوپتیکی چشم‌گیر می‌باشد. مقدار فاکتور فراوانی محاسبه‌شده که برابر ٦/۱ می‌باشد، مشابه مقادیر محاسبه‌شده در حوضه‌های شمال شرق ایران (تاج‌بخش و قهرمان، ۱۳۸۸)، اسپانیا (کاساس و همکاران، ۲۰۱۰) و مالزی دسا و راخچا (۲۰۰۷) است و نتایج PMP آماری ناشی از آن با نتایج روش سینوپتیکی که از اطلاعات زیادی بهره برده و روش قابل اعتمادی است، تقریباً یکسان می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت انتخاب فاکتور فراوانی ٦/۱ برای منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای محاسبه‌ی PMP آماری در حوضه‌ی آب‌ریز سد بختیاری، براساس حداکثر بارش مشاهده‌شده مقدار فاکتور فراوانی برای همه‌ی ایستگاه‌های منطقه در تداوم‌های مختلف محاسبه گردید و حداکثر آنها که برابر ٦/۱ می‌باشد، به‌عنوان فاکتور فراوانی برای کل منطقه در محاسبه‌ی PMP در

نظر گرفته شد. بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد که نتایج PMP آماری در تداوم‌های ۱ تا ۷ روز با این فاکتور فراوانی، تقریباً مشابه روش سینوپتیکی می‌باشد. در حالی که اگر فاکتور فراوانی مشابه اکثر تحقیقات گذشته برابر ۱۵ در نظر گرفته شود آنگاه مقدار PMP دو برابر حالت قبل (یعنی K=٦/١) می‌گردد. مقدار مشاهده‌ی PMP سینوپتیکی و آماری با فاکتور فراوانی ٦/١ در تداوم‌های مختلف حدود ۵۵ درصد است که در حد معقول می‌باشد. اما درصد مشاهده برای PMP آماری با فاکتور فراوانی ۱۵ کمتر از ۳۰ درصد و این نشان‌دهنده‌ی برآورد زیاد PMP می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت مقدار مناسب فاکتور فراوانی برای حوضه‌ی سد بختیاری برابر ٦/١ می‌باشد که مؤید آن نزدیکی نتایج آن با روش سینوپتیکی می‌باشد.

مراجع

1. Fattahi, E., Noorian, A. M. and Noohi, K., "Comparison of physical and statistical methods for estimating probable maximum precipitation in southwestern basins of Iran", Desert, Vol.15, pp. 127-132, (2011).
2. Hershfield, D.M., "Estimating the probable maximum precipitation", *Journal Hydraulics Division*, Vol.87, pp.99– 106, (1961).
3. Hershfield, D.M., "Method for estimating probable maximum precipitation", *Journal American Water Works Association*, Vol. 57, pp. 965–972, (1965).
4. Chow, V.T., "A general formula for hydrologic frequency analysis", Transactions American Geophysical Union, Vol.32, pp. 231–237, (1951).
5. World Meteorological Organization, "Manual for estimation of probable maximum precipitation", Operational Hydrology Report, No. 332, (1986).
6. Desa, M., Noriah, M.N., Rakhecha, A.B., "Probable maximum precipitation for 24-hr duration over Southeast Asian monsoon region-Selangor, Malaysia", Atmospheric Research, Vol. 58, pp. 41–54, (2001).
7. Casas, M. C., Rodrıguez, R., Nieto, R. and Redano, A., "The estimation of probable maximum precipitation the case of Catalonia, trends and directions in climate research", Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 1146, pp. 291–302, (2008).
8. Casas, M. C., Rodrıguez, R., Prohom, M, Gazquezb, A. and Redanoc, A., "Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain)", *International Journal of Climatology*, Vol. 5, pp.512-518, (2010).
9. Ghahreman, B., "The estimation of one day duration probable maximum precipitation over Atrak watershed in Iran", *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol.32, pp.175-179, (2008).

۱۰. شفیعی، م. و قهرمان ب.، " بررسی تغییرات مکانی حداکثر بارش محتمل ٢٤ ساعته در حوضه‌ی آب‌ریز قره‌قوم"، مجله‌ی آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۳، شماره‌ی ۲، صص.۵۰-۵۹، (۱۳۸۸).

۱۱. تاج‌بخش، م. و قهرمان ب.، " برآورد حداکثر بارش محتمل ٢٤ ساعته به روش‌های آماری در شمال شرق ایران"، مجله‌ی پژوهش‌های

حفاظت آب و خاک، جلد ١٦، شماره‌ی ۱، صص. ۱۲۳–١٤١، (۱۳۸۸).

12. Desa, M., Rakhecha, P.R., "Probable maximum precipitation for 24-h duration over an equatorial region: Part 2-Johor. Malaysia", Atmospheric Research, Vol.84, pp. 84–90, (2007).

۱۳. بختیاری، ب.، "بررسی مقادیر حداکثر بارش محتمل در چهار ایستگاه منتخب جنوب شرق ایران به روش آماری"، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل، صص. ۱۱۲–١٢٤، (۱۳۸۰).